

**РАБОТА СИНХРОННОГО УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА
НА НЕЛИНЕЙНУЮ АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ**

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. В. ЛООС, Э. И. СОБКО

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

В физике и технике существует целый ряд импульсных потребителей энергии, имеющих нелинейный активный характер нагрузки.

Импульсный режим питания применяют в мощных генераторах низкотемпературной плазмы — так называемых плазмотронах [1]. Разрядный ток в плазме, возникающей между электродами разрядника, погруженного в жидкость, применяют также в устройствах, использующих электрогидравлический эффект — например, установках для возбуждения сейсмических колебаний при геологоразведке и изучении структуры земной коры. В установках для импульснодуговой сварки на стабильно горящую сварочную дугу подаются мощные кратковременные импульсы электрической энергии.

Импульсное питание используется в оптических квантовых генераторах-лазерах, способных обеспечить исключительно высокую плотность энергии в узком направленном пучке электромагнитного излучения. Например, в рубиновых лазерах когерентный луч формируется в крупном кристалле синтетического рубина, который возбуждается мощным световым импульсом, возникающим при протекании тока через импульсную лампу. Коэффициент полезного действия лазера, т. е. отношение энергии когерентного луча к энергии световой вспышки, весьма невелик — от 0,1 до 0,5%. Поэтому уже в настоящее время для получения мощных пучков электромагнитного излучения необходимы импульсные источники питания, способные передавать в нагрузку за время одного импульса тока энергию свыше 100 Мдж [2].

Импульсная система питания является необходимой для обеспечения работы установок, предназначенных для испытаний моделей летательных аппаратов в дуговых аэродинамических трубах.

Анализ существующих тенденций в решении проблемы импульсного питания при энергиях в нагрузке в десятки и сотни мегаджоулей свидетельствует, что наиболее целесообразно искать решение в создании и применении источников энергии электромашиного типа.

Одним из наиболее перспективных импульсных источников является синхронный ударный генератор. Вопросы применения ударных генераторов для создания импульсных магнитных полей [3, 4, 5, 6] и при питании линейной активной нагрузки [7, 8] рассматривались многими исследователями. Однако до сих пор отсутствуют какие-либо работы, посвященные теоретическим и экспериментальным исследованиям работы ударного генератора на нелинейную активную нагрузку.

Рассмотрим некоторые результаты исследования работы синхронного ударного генератора при питании нелинейной активной нагрузки — импульсной дуги. Наиболее полно отражает происходящие процессы система дифференциальных уравнений электромеханического переходного процесса однофазного синхронного генератора:

а) уравнения равновесия напряжений обмоток

$$\begin{aligned} 0 &= i_c r_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + U_d, \\ U_B &= i_B r_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \\ 0 &= i_{Dd} r_{Dd} + \frac{d\Psi_{Dd}}{dt}, \\ 0 &= i_{Dq} r_{Dq} + \frac{d\Psi_{Dq}}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

б) уравнения движения ротора

$$M_m = H_j \frac{d\omega}{dt} + M_\Sigma, \quad (2)$$

в) уравнения потокосцеплений обмоток

$$\begin{aligned} \Psi_c &= i_c x_c + i_B x_a \cos \omega t + i_{Dd} x_a \cos \omega t + i_{Dq} x_a \sin \omega t, \\ \Psi_B &= i_c x_a \cos \omega t + i_B x_B + i_{Dd} x_a, \\ \Psi_{Dd} &= i_c x_a \cos \omega t + i_B x_a + i_{Dd} x_{Dd}, \\ \Psi_{Dq} &= i_c x_a \sin \omega t + i_{Dq} x_{Dq}, \end{aligned} \quad (3)$$

где индексы с, в, Dd, Dq при переменных и параметрах относятся соответственно к обмоткам статора, возбуждения и эквивалентных демпферных контуров по продольной и поперечной осям,

x_a — сопротивление взаимоиндукции при совпадении осей обмоток,

ω — угловая скорость вращения ротора,

M_m — момент механических сил,

H_j — инерционная постоянная ротора,

$M_\Sigma = x_a i_c (i_{Dq} \cos \omega t - i_B \sin \omega t - i_{Dd} \sin \omega t)$ — момент электромагнитных сил,

U_d — падение напряжения на дуге.

Импульсная дуга является динамической. В ней нет однозначной зависимости напряжения от тока. При возрастании тока эта зависимость отличается от таковой при его уменьшении. На осциллограмме рис. 1 приведены характерные изменения тока и напряжения импульсной дуги при питании ее от модельного ударного генератора. При характерном импульсе тока ударного генератора напряжение дуги имеет своеобразную форму.

В начале импульса оно быстро возрастает и достигает максимального значения, называемого напряжением зажигания дуги. Затем напряжение быстро падает до минимума, называемого минимальным напряжением дуги и остается постоянным до конца импульса тока. В конце импульса тока напряжение возрастает до напряжения гашения дуги.

Наиболее полно процессы изменения сопротивления дуги при изменениях тока в ней и условий ее горения характеризуются дифференциальным уравнением дуги [9]. Вольтамперные характеристики описанных выше устройств, в основу которых положено использование импульсной дуги, определяются их конструкцией и могут иметь различный характер. Для выяснения качественной картины принимаем некоторые

допущения [10]. Будем считать, что градиент напряжения в створе дуги постоянен. Это значит, что мы пренебрегаем пиками напряжений зажигания и гашения дуги, и, следовательно, напряжение дуги при постоян-

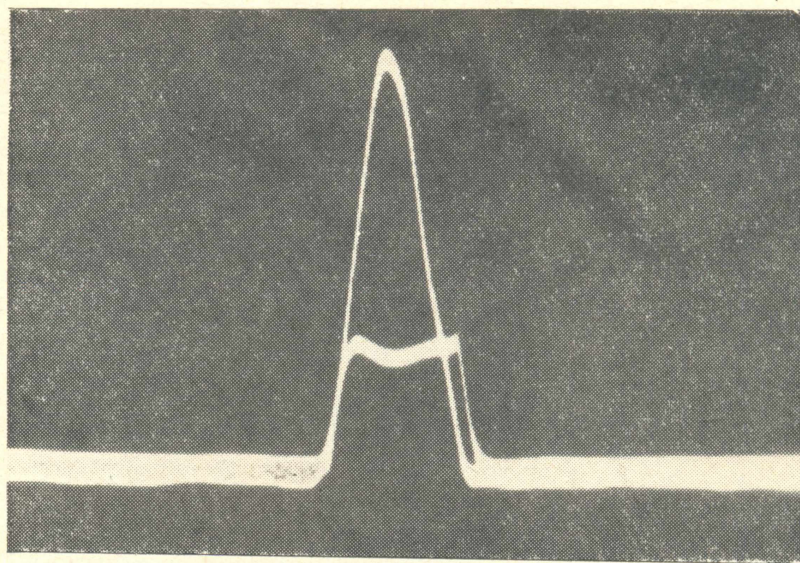


Рис. 1. Осциллограмма напряжения и тока импульсной дуги

ной ее длине $l = \text{const}$ будет постоянным в течение всего импульса тока и равным

$$U_d = E_a l. \quad (4)$$

Принятые допущения вполне оправданы.

Действительно, одной из главных задач исследований является определение оптимальной длины дуги, при которой в ней выделится максимальная энергия в зависимости от параметров ударного генератора. Ввиду больших токов, при которых работает ударный генератор, пики напряжения зажигания и гашения (рис. 1) невелики, но даже и тогда, когда они значительны, длительность их мала и на величине энергии они мало сказываются.

Энергия, выделяемая в дуге за время импульса тока ударного генератора, определяется по формуле:

$$W_d = \int_0^{t_u} U_d i_c dt = U_d \int_0^{t_u} i_c dt, \quad (5)$$

где t_u — длительность импульса тока.

Ток i_c определяется из решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений (1), (2), (3). Решение этих уравнений в общем виде отсутствует, поэтому с целью возможностей выполнения большой программы исследования по системе уравнений (1), (2), (3) была разработана математическая модель на базе аналоговой вычислительной машины МН-14.

На рис. 2 приведены энергетические характеристики ударного генератора при работе на дугу в зависимости от напряжения горения дуги и сверхпереходного сопротивления ударного генератора x_d'' . Можно видеть, что в данном случае максимальная энергия в дуге выделяется при напряжении горения дуги и в относительных единицах $U_d = 0,32$, которое

является одинаковым при любых значениях x_d'' . За базисные величины приняты амплитуда номинального фазного напряжения генератора

$$e_0 = E_m$$

и энергия

$$W_0 = 0,5 e_0 i_0 t_0.$$

Используя зависимость (4), можно определить, на основании вышеизложенного, для каждого конкретного генератора величину согласованного дугового промежутка при известном градиенте напряжения E_a .

Для инженерных расчетов необходимы аналитические выражения для определения тока и энергии в дуге. Определим их, воспользовавшись частичным применением теоремы о постоянстве потокосцеплений [11]. Возможность ее применения подтверждается осциллограммами потокосцеплений обмоток ударного генератора при работе на дугу (рис. 3), из которых видно, что потокосцепления Ψ_B , Ψ_{dd} , Ψ_{dq} за время импульса тока практически не изменяются. Пренебрегая падением

напряжения на активном сопротивлении обмотки статора в сравнении с напряжением на дуге U_d , закон изменения потокосцепления Ψ_c можно представить в виде

$$\Psi_c = \Psi_{co} - U_d t, \quad (6)$$

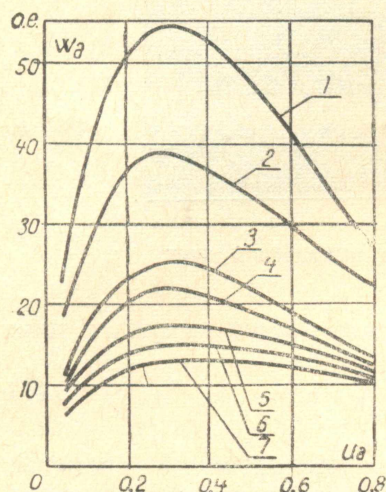


Рис. 2. Энергетические характеристики ударного генератора при работе на дугу: 1— $x_d'' = 0,015$; 2— $x_d'' = 0,02$; 3— $x_d'' = 0,03$; 4— $x_d'' = 0,035$; 5— $x_d'' = 0,05$; 6— $x_d'' = 0,06$; 7— $x_d'' = 0,07$

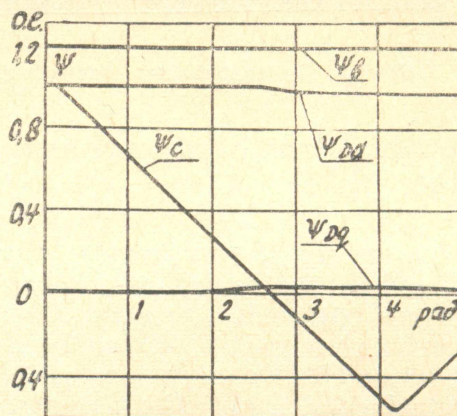


Рис. 3. Характер изменения потокосцеплений обмоток ударного генератора при работе на дуговую нагрузку

где Ψ_{co} — потокосцепление статорной обмотки в начальный момент.

Принимая $x_d'' = x_q''$, что вполне допустимо для ударного генератора, после преобразований уравнений (3) с учетом (6) выражение для тока:

$$i_c = \frac{\omega}{x_d''} \left(\Psi_{co} - U_d t - \frac{E_m}{\omega} \cos \omega t \right). \quad (7)$$

Энергия, выделяемая в дуге, определяется в данном случае по формуле:

$$W_d = \frac{0,5 U_d \omega}{x_d''} \left(\Psi_{co} t - \frac{t^2 U_d}{2} - \frac{E_m}{\omega^2} \sin \omega t \right). \quad (8)$$

Длительность импульса определяется из приближенного решения трансцендентного уравнения (7)

$$t_u = \frac{\pi}{\omega} - \frac{U_d}{E_m \omega} + \frac{1}{E_m \omega} \sqrt{U_d^2 + 4 E_m^2 + 2 \pi U_d E_m}. \quad (9)$$

На рис. 4 приведены зависимости $i_c = f(t)$ и $W_d = f(t)$, рассчитанные для ударного генератора с параметрами в о.е. $x_d'' = 0,0391$, $x_b = 1,2$, $x_{Dd} = x_{Dq} = 1,02$, $r_c = 0,00156$, $r_b = r_{Dd} = r_{Dq} = 0,001$, $U_b = 0,001$, $H_j = 5,9$ сек

по полной системе уравнений на аналоговой машине МН-14 (сплошные линии) и по упрощенным зависимостям (7), (8) (пунктирные линии). Как видно из рисунка, несмотря на большие расхождения в расчетах тока конечное значение энергии, выделившейся в дуговом промежутке, достаточно хорошо согласуется с расчетами по полным уравнениям и упрощенным формулам (7), (8).

Подставив значение напряжения горения дуги $U_d = 0,32$ в (8) с учетом (9), получим простую эмпирическую формулу для определения энергии, выделившейся в согласованном дуговом промежутке при питании его от ударного генератора:

$$W_b = \frac{0,41 E_m^2}{x_d'' \omega} \quad (10)$$

Таким образом, в результате исследований работы ударного генератора на нелинейную активную нагрузку — импульсную дугу — получены выражения для тока (7) и энергии, выделяемой в дуге (8), длительности горения дуги (9), а также даны рекомендации по выбору параметров согласованного дугового промежутка. Сравнение результатов расчетов по полной системе уравнений (1), (2), (3) и по полученным аналитическим выражениям (7), (8), (9) показывает их хорошую сходимость.

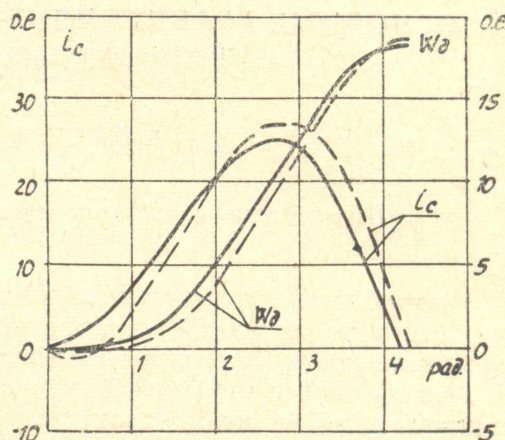


Рис. 4. Характер изменения тока и энергии в импульсной дуге: — расчет по полной системе уравнений, --- расчет по упрощенным формулам

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Шашков, О. И. Ясько, В. Л. Сергеев, Ф. Б. Юревич. Электродуговые подогреватели для получения высокотемпературных струй. Электрофизический журнал, 1962, № 1.
2. С. П. Кононов, Б. А. Скребнев. Применение импульсных электроэнергетических систем. Импульсная электроэнергетика, Казань, 1970.
3. В. В. Каплан, В. М. Нашатырь. К вопросу о применении электромашинных накопителей энергии для физических исследований. «Электричество», 1966, № 4.
4. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Удельная энергия ударного генератора. «Известия ТПИ», т. 132, 1965.
5. Ф. К. Архангельский, А. И. Столов. Применение генераторов для создания импульсных магнитных полей с большими запасами энергии. Электрофизическая аппаратура, 1966, вып. 4.
6. Г. А. Сипайлов, В. В. Ивашин, А. В. Лоос. Генератор больших импульсных мощностей со ступенчатой или трапецидальной формой тока. «Электричество», 1967, № 5.
7. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, Ф. П. Зверев. Ударный генератор как источник импульсной мощности при активной нагрузке. Устройства электропитания и электропривода малой мощности. т. 2, «Энергия», 1970.
8. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, Ю. А. Романов, Ф. П. Зверев. Автономный источник импульсной мощности с синхронным генератором. «Известия ТПИ», т. 212, 2, 1971.
9. O. Mayr. Beitrag zur Theorie der statischen und dynamischen Lichtbogen, AfE, 1943, Bd. 37.
10. Л. М. Залесский. Электрическая дуга отключения, ГЭИ, 1963.
11. И. И. Трещев. Методы исследования электромагнитных процессов в машинах переменного тока. «Энергия», 1969.
12. Заказ 6523.